

双级四脚矩阵变换器随机载波调制原理与实现

粟梅, 夏立勋, 孙尧, 谢红军
(中南大学, 湖南 长沙 410083)

摘要: 双级四脚矩阵变换器 (Four-leg Indirect Matrix Converter, 简称 FIMC) 的空间矢量调制需要复杂的三维矢量合成运算。使用随机载波调制不仅能简化运算过程, 还能减弱开关频率附近的噪声干扰。在此制作了一套基于载波调制的 FIMC 样机, 并随机使用 4 种不同载波形式重塑输出电压噪声频谱。实验结果表明, 该 FIMC 容易实现, 且能够改善输出电压在整数倍开关频率附近的噪声分布。

关键词: 变换器; 载波 / 载波调制

中图分类号: TM46

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X (2008) 01-0035-03

Design and Realization of Randomized Carrier-wave Modulation of Four-leg Indirect Matrix Converter

SU Mei, XIA Li-xun, SUN Yao, XIE Hong-jun

(Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Space-vector modulation of four-leg indirect matrix converter (FIMC) requires complicate three-dimensional vector computing. The randomized carrier modulation can be used alternatively to simplify duty-cycle calculations and to suppress noise at switching frequency. An experimental prototype FIMC was developed along with randomized selection of four types of carrier waveforms to reshape the noise spectrum and to reduce the noise energy at certain frequencies. The experimental results show that randomized carrier modulation of FIMC is simple in structure with the benefit of attenuated noise energy for output voltages at switching frequency and its multiples.

Keywords: converter; carrier / carrier modulation

Foundation Project: Supported by National Natural Science Foundation of China (No.60674065), Hunan Natural Science Foundation (No.05JJ30102), Scientific and Technological Research Programs for Hunan Province (No.05GK3035)

1 引言

双级四脚矩阵变换器 (FIMC)^[1]通过在双级矩阵变换器上增加一个逆变桥臂, 提高了三相四线的输出能力, 可以抑制由负载不平衡引起的输出电压不平衡, 所以拓宽了矩阵变换器的应用范围。文献[2]提出了一种空间矢量的调制方法, 但是需要在三维空间进行复杂的参考矢量合成。

在此, 提出了一种采用随机载波调制的 FIMC 算法, 不仅能减小 FIMC 的调制复杂度, 而且能改善系统的噪声频谱。制作了一套 2.2 kW 随机载波调制 FIMC 样机并进行了实验, 结果表明, 随机载波调制实现简单, 可以减少整数倍开关频率噪声的能量。

2 拓扑结构及随机载波调制算法

2.1 拓扑结构

图 1 示出一种双级 FIMC 的拓扑结构。图中变

换器的前端为整流级, 后端为传统四桥臂逆变器。整流级上半桥臂开关 VT_{Ap} , VT_{Bp} , VT_{Cp} 和下半桥臂开关 VT_{An} , VT_{Bn} , VT_{Cn} 分别进行横向换流; 逆变级 4 个桥臂的开关进行纵向换流。

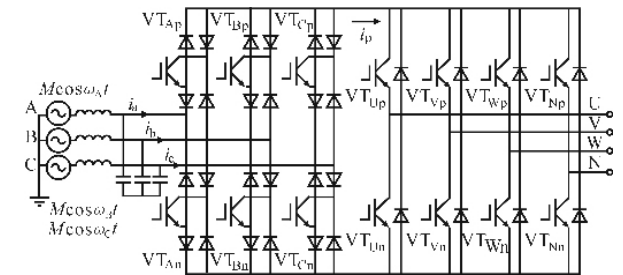


图 1 一种双级四脚矩阵变换器拓扑结构

2.2 载波调制算法

2.2.1 整流级调制

整流级根据输入相电压的正负极性, 将一个周期分为 6 个扇区^[3-4], 以 $U_A > 0$, $U_B < 0$, $U_C < 0$ 扇区为例, VT_{Ap} 的占空比 $d_A=1$, VT_{Bn} 和 VT_{Cn} 的占空比分别为:

$$d_B = \frac{\cos \theta_B}{\cos \theta_A} \quad (1)$$

$$d_C = \frac{\cos \theta_C}{\cos \theta_A} \quad (2)$$

式中 $\cos \theta_B$, $\cos \theta_C$ 为具有相同极性的输入单位相电压同理可得其他扇区公式。整流级每周输出电

基金项目: 国家自然科学基金 (60674065); 湖南省自然科学基金 (05JJ30102); 湖南省科技攻关计划 (05GK3035)

定稿日期: 2007-12-03

作者简介: 粟梅 (1967-), 女, 湖南汉寿人, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统自动化、电力电子及电力传动。

压为两个不连续的直流分量，记作第一整流区间和第二整流区间。

2.2.2 逆变级调制

首先确定输出差模分量的基波值 $u_{UN} \mu_{VN} \mu_{WN}$ ，并以此作为参考。然后选择零序分量 u_{NO} 的参考值。为了确保进行线性调制，即 $|U_{i0}| < 1$ ， A, B, C, U_{NO} 必须要满足：

$$-\frac{U_{dc}}{2} - u_{NO} < \frac{U_{dc}}{2} - \max(u_{UN} \mu_{VN} \mu_{WN})$$

when $\min(u_{UN} \mu_{VN} \mu_{WN}) > 0$ (3)

$$-\frac{U_{dc}}{2} - \min(u_{UN} \mu_{VN} \mu_{WN}) < u_{NO} < \frac{U_{dc}}{2}$$

when $\max(u_{UN} \mu_{VN} \mu_{WN}) < 0$ (4)

$$\frac{U_{dc}}{2} - \min(u_{UN} \mu_{VN} \mu_{WN}) < u_{NO} < \frac{U_{dc}}{2} - \max(u_{UN} \mu_{VN} \mu_{WN})$$

when others (5)

接下来计算各桥臂相对于虚拟地的电压参考 $U_{i0} \mu_{i0}$ ， $i = U, V, W, N$ ，并对一个周期中不同直流电压进行标么化，即：

$$U_{i0} = u_{iN} + u_{NO} \mu_{i0} \quad i = U, V, W, N \quad (6)$$

在第一整流区间有：

$$U_{i0} = \frac{4U_{i0} |\cos \beta t|}{3M} \quad (7)$$

式中 M 为输入电压幅值
第二整流区间有：

$$U_{i0} = \frac{4U_{i0} |\cos \alpha t|}{3M} \quad (8)$$

最后偏置标么值生成占空比，即：

$$d = \frac{1+U_{i0}}{2} \quad (9)$$

$$d = \frac{1-U_{i0}}{2} \quad (10)$$

得到占空比后就能使用不同的载波对占空比进行比较，以产生开关状态。

3 系统结构与硬件设计

为了简化系统设计，采样板采集 A 相交流电压的过零点同步信号，并将其调理为 3.3V 的 LVTTTL 电平。三相输入电压的瞬时相位通过调制周期和相位关系计算得到。

图 2 示出系统框图。控制板由 TMS320LF2407A 型 DSP、EPM1270T144C5 型 CPLD 及隔离芯片组成。变换器需要整流级和逆变级开关协调控制，且 DSP 双事件管理器协调工作能力较弱，故采用了片外 CPLD 芯片来处理底层开关换流及死区生成过程。此外，CPLD 还要对 IGBT 的过流故障进行处理。DSP 负责捕捉输入电压过零同步信号和占空比计

算。为简化 DSP 程序调试，控制板增加了一块 STC62WV12816 型 SRAM 作为程序调试空间。

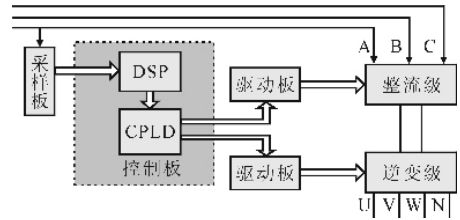


图 2 系统框图

驱动板采用 M57962L 型 IGBT 混合驱动芯片，由 24V 隔离电源供电，减少了外围元件的数目并简化了驱动设计。

4 系统软件设计

4.1 DSP 部分

DSP 程序分为初始化和定时中断服务程序 (ISR) 两部分，如图 3 所示，定时中断周期为 400 μs 。

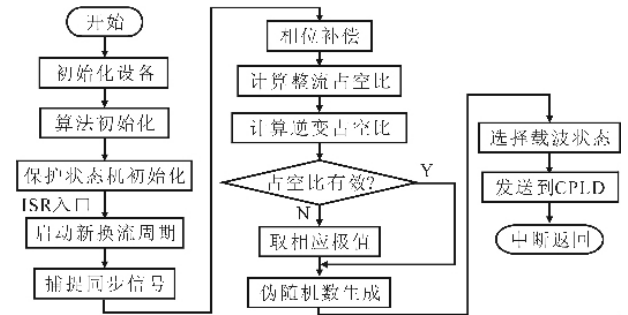


图 3 DSP 程序框图

每个调制周期程序只做一次除法，使用 TI QMath 定点库的倒数函数辅助完成。当程序在芯片内部 FLASH 中运行时，ISR 用时约 20 μs 。16 位伪随机数采用线性同余算法生成，种子数为 21845，乘数为 31821，增量为 13849，模数为 65536^[9]。图 4 示出载波选择概率状态机。4 种载波状态分别为 C_0, C_1, C_2, C_3 。使用该概率状态机对载波进行选择。所有占空比数据和载波模式在 ISR 结束前发送到 CPLD。

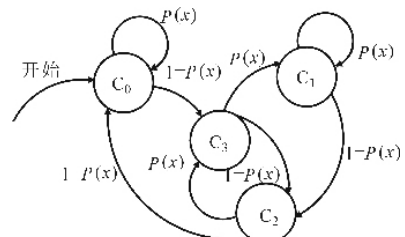


图 4 载波选择概率状态机

4.2 CPLD 部分

CPLD 在接受占空比数据后，与周期计数器比较生成全局控制信号，用来同步整流级和逆变级的动作。整流级开关动作由状态机实现，逆变级开关动作由载波截取占空比实现。CPLD 内部包含 4 种载波形式，根据 DSP 指令选择其中一种与占空比进行

比较后输出。载波法中的死区由占空比偏置固定数值实现。图 5 示出 4 种不同载波形式。

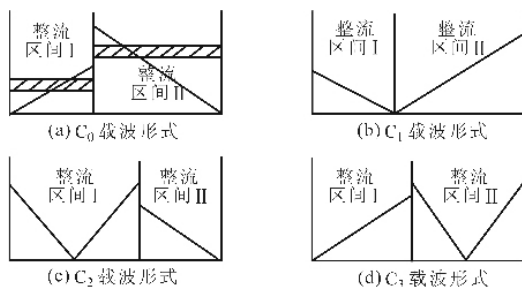


图 5 不同载波形式

未经优化的 VHDL 代码综合布线后大约占用 832 个逻辑单元,最高时钟频率约为 85 MHz。

5 实验结果及结论

根据上述方法研制了随机载波 FIMC 样机,并进行了开环空载测试,参考输出为 25 Hz 平衡三相电压,输入线电压为 140V/50Hz,滤波电容为 10 μ F,系统开关频率为 2.5kHz,调制系数为 0.5,图 6 示出整流级驱动信号 u_{gsVT} ,直流母线电压 U_{dc} ,空载时直流母线电流 I_{dc} 和 IGBT 过流保护信号 U_p 的实验波形。

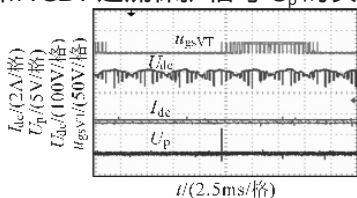


图 6 实验波形

图 7 示出在随机载波和固定载波下,输出线 u_o 电压 u_o 波形及其 FFT 频谱。由图可见,使用随机载波调制后,频谱中整数倍开关频率的高频分量得到了减弱,频谱更加平直。

随机载波调制 FIMC 不仅实现简单,而且能够重

塑输出电压噪声频谱,使输出电压噪声频谱更加平直,减少了整数倍开关频率的噪声干扰,使 FIMC 能够在有噪声限制需求的环境中运行,具有一定的应用前景。

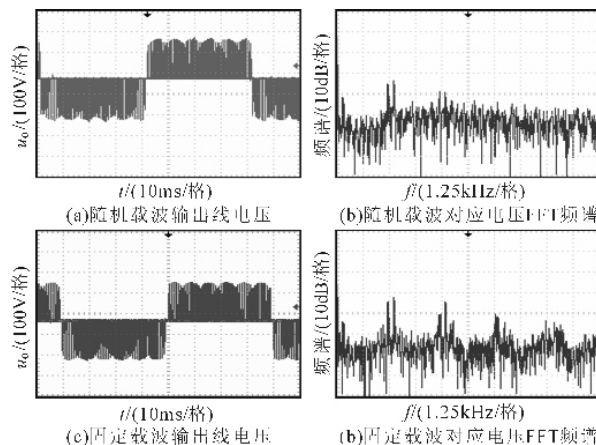


图 7 线电压及其 FFT 频谱

参考文献

- [1] P W Wheeler, J C Clare, N Mason. Space Vector Modulation for a 4-Leg Matrix Converter [A]in Power Electronics Specialists Conference, 2005.PESC 05.IEEE 36th [C].Sept. 2005 31- 38.
- [2] Fan Yue, Patrick W Wheeler, Jon C Clare. A Novel Four-leg Matrix Converter [A].IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference[C].Nov.2006 2694- 2699.
- [3] J W Kolar, M Baumann, F Schafmeister, et al. Novel Three Phase AC-DC-AC Sparse Matrix Converter [A].Proc. of APEC '02[C].2002, (2) :777- 791.
- [4] 粟梅,余岳,覃恒思等.基于 DSP+CPLD 的双级矩阵变换器设计与实现[J].电力电子技术, 2007, 41 (6) :1- 3.
- [5] Eric Wilbur, TI Application Note, Spru239[Z].Texas Instruments, 1994.

(上接第 5 页)所需的输入变压器次级引线更少。由于满足调制条件,则高压单元中开关器件所需的导通频率更低,这样就可选择 GTO, SCR, IGBT 等慢速开关器件。这类器件的通流容量往往较大,有利于设计和制造大功率高压变频器。低压单元可选择 MOSFET 等开关器件,这类器件的开关频率较高,且低压单元的电平阶跃值小,使得输出波形中 du/dt 和输出结构都较小。此外,还可通过增加串联低压单元数来提高输出电压精度。

5 结论

非对称多电平逆变器结构是一种高精度的结构,它能够减少绝缘电源数目,提高能效。该结构扩展了设计灵活性,并提高了优化组合匹配的可能性。

参考文献

- [1] A Nabae, H Akagi. A New Neutral-point-clamped PWM Inverter [J].IEEE Trans. on Industry Applications, September 1981, 17 (5) :518- 523.
- [2] T Meynard, H Foch. Multi-level Choppers For high Voltage Applications [J].Applications EPE Journal, 1992, 2 (1) :45- 50.
- [3] R Schafer. Vom Hydrogenerator Uber Rotierende Umformer Zum Vollstatischen Umrichter [J].Bulletin SEV/SE, November 1994, 93 (11) :3- 30.
- [4] M D Manjrekar, P K Steimer, T A Lipo. Hybrid Multilevel Powerconversion System: A Competitive Solution for High Power Applications [J].IEEE Trans. on Industry Applications, May/June 2000, 36 (3) :834- 841.
- [5] 惠晶,张峰久.基于 DSP 移相调频控制的逆变电源研究[J].电力电子技术, 2006, 40 (1) :76- 78.